

УДК 621.039

О ПОВЫШЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА И БЕЗОПАСНОСТИ АЭС ТИПА ВВЭР ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЯДЕРНОГО ПЕРЕГРЕВА ПАРА

В. С. Костарев¹, И. А. Ширманов², Д. Н. Литвинов³, С. Е. Щеклеин⁴

^{1,2,3,4} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ slavakostarev@yandex.ru

Аннотация. В работе представлено обоснование эффективности применения огневого перегрева пара в термодинамическом цикле АЭС с реактором ВВЭР-1200 для повышения эффективности использования ядерного топлива, а также безопасности реакторной установки в целом.

Ключевые слова: тепловая схема АЭС, повышение безопасности АЭС, ВВЭР-1200, глубина выгорания ядерного топлива

ON THE POSSIBILITY OF EFFICIENCY INCREASING OF THE NUCLEAR FUEL USAGE AND NPP SAFETY AT NPPS WITH WWER REACTOR BY USING NON-NUCLEAR STEAM SUPERHEATING

V. S. Kostarev¹, I. A. Shirmanov², D. N. Litvinov³, S. E. Shcheklein⁴

^{1,2,3,4} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ slavakostarev@yandex.ru

Abstract. The paper presents the substantiation of the effectiveness of using fire steam superheating in the thermodynamic circuit of a nuclear power plant with a WWER-1200 reactor to increase the efficiency of using nuclear fuel, as well as the safety of the reactor plant.

Keywords: NPP thermal circuit, NPP safety improvement, WWER-1200, nuclear fuel burnup

В настоящее время самым распространенным в атомной энергетике типом реактора является реактор с водой под давлением (ВВЭР, или PWR).

Существенным недостатком таких реакторов является низкое значение начальных параметров пара (температура и давление). Это объясняется ограничением по температуре, равным 350 °С для оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛОВ) из циркониевых сплавов. По этой причине температура пара во втором контуре не может превышать 315 °С. Коэффициент полезного действия (КПД) современных атомных электростанций (АЭС) с водо-водяными реакторами находится на уровне 35 %, что ниже КПД современных тепловых электростанций (ТЭС) (45 %) и значительно ниже КПД парогазовых электростанций (60 %) [1].

В работе рассматривается возможность повышения эффективности использования ядерного топлива и безопасности реакторов типа ВВЭР (водо-водяной энергетический реактор) путем применения начально-го огневого перегрева пара в термодинамическом цикле АЭС [2; 3].

Для достижения цели авторами моделировалась тепловая схема АЭС с реактором типа ВВЭР с применением в термодинамическом цикле начального огневого перегрева пара, произведен анализ такой тепловой схемы на предмет целесообразности потенциального применения.

Для решения задачи повышения эффективности использования ядерного топлива и безопасности авторами было принято решение понизить параметры первого и второго контура такой ядерной энергетической установки, исходя из термодинамических соображений. Таким образом, после понижения начальные параметры второго контура АЭС приняли следующие значения: $P = 3,98$ МПа, $T = 250$ °С, а параметры первого контура — следующие: $P = 8,0$ МПа, $T = 275$ °С.

Для компенсации снижения электрической мощности и КПД после понижения начальных параметров в тепловую схему после парогенератора был добавлен газовый котел. Таким образом, в предлагаемой авторами модификации тепловой схемы АЭС с реактором типа ВВЭР пар после парогенератора с пониженными параметрами попадает в огневой котел на начальный перегрев, где перегревается до температуры 650 °С, после чего подается на турбину. В связи с высокой температурой пара после котла становится возможным отказаться от системы промежуточного перегрева (после ЦВД пар обладает достаточно высокой температурой для подачи сразу в цилиндр низкого

давления (ЦНД)). Такой вариант тепловой схемы был смоделирован и рассчитан при помощи системы автоматизированного проектирования United Cycle.

По результатам моделирования и расчета в системе автоматизированного проектирования (САПР) United Cycle были определены КПД нетто и электрическая мощность предлагаемой авторами тепловой схемы. Численные значения параметров равны: $N_3 = 2048$ МВт, $\eta_{\text{нетто}} = 37,21\%$, что выше, чем у стандартной тепловой схемы ВВЭР-1200. Требуемый расход газообразного топлива в котле при этом составит $51,10 \text{ м}^3$.

Относительный прирост глубины выгорания у такой схемы в сравнении со стандартной составляет $2,9\%$. Это означает, что понижение начальных параметров термодинамического цикла АЭС позволяет увеличить глубину выгорания ядерного топлива в реакторе, и, как следствие, продолжительность топливной кампании.

Применение огневого перегрева пара позволяет привести не только к повышению коэффициента полезного действия и снижению глубины выгорания ядерного топлива, но и к общему изменению других показателей.

В связи с уменьшением давления первого контура до 8 МПа (16 МПа без использования огневого перегрева пара) появляется возможность для существенного снижения толщины корпуса реактора [4], что в дальнейшем способствует удешевлению его производства, а также увеличивает пространство, которое способна занять биологическая защита. Также это позволяет снизить общую металлоемкость блока с реактором ВВЭР-1200, т. к. со снижением давления снижается не только толщина корпуса, но и толщина стенок арматуры и трубопроводов, связанных с первым контуром реактора.

Согласно расчетам, понижение параметров первого контура на 32% , снижает расход текучей среды во время разрыва трубопровода первого контура, что снижает риск травм, жертв среди обслуживающего персонала, время на восстановление участка трубопровода при аварии такого типа установки [5].

Также понижение начальных параметров вкпе с применением огневого перегрева пара приводит к уменьшению удельного расхода охлаждающей воды. Удельный расход охлаждающей воды в модифицированной схеме на 2050 МВт составит $116,5 \text{ т/ч}$. В сравнении с проектной тепловой схемой удельный расход охлаждающей воды на 1 МВт снижен на $21,6\%$.

Таким образом, понижение начальных параметров первого и второго контуров АЭС с реактором типа ВВЭР с последующим применением неядерного (огневого) перегрева пара позволяет повысить электрическую мощность, вырабатываемую АЭС и коэффициент полезного действия. Также при этом наблюдается повышение глубины выгорания ядерного топлива, снижение расхода текучей среды при разрыве трубопровода первого контура и уменьшение удельного расхода охлаждающей воды в конденсаторе. Можно сделать вывод, что применение понижения начальных параметров вкуче с последующим огневым перегревом пара на АЭС типа ВВЭР является оправданным мероприятием для повышения эффективности использования ядерного топлива и безопасности АЭС в целом.

Список источников

1. Отчет о функционировании ЕЭС России в 2019 году [Электронный ресурс] // Системный оператор Единой энергетической системы. 2019. 18 с. URL: https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/reports/disclosure/2020/ups_rep2019.pdf (дата обращения: 06.12.2020).
2. Касилов В. Ф., Низовой А. В. Перспективы использования парогазовых технологий в энергоблоках атомных электростанций // Науч. исслед.: от теории к практике. 2015. № 4 (5). С. 34–38.
3. Щеклеин С. Е., Титов Г. П., Борисова Е. В. Влияние температурных характеристик на глубину выгорания ядерного топлива // Вестник Одес. политехн. ун-та. 2011. № 2 (36). С. 104–108.
4. Захарова Л. П., Киреев Н. В. Современные подходы к обоснованию прочности корпуса реактора СМ // Сборник трудов АО ГНЦ НИИАР. 2017. № 1. С. 21–27.
5. Методика оценки риска аварий на опасных производственных объектах нефтегазоперерабатывающей, нефте- и газохимической промышленности [Электронный ресурс] : руководство по безопасности : утверждено приказом Федер. службы по экол., технол. и атом. надзору от 29.06.2016 № 272. Доступ из электрон. фонда правовых и норматив.-техн. док. «Кодекс». URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200136968?marker=7D20K3> (дата обращения: 06.12.2020).